

기후변화 적응대책의 리스크 저감효과 분석 방법론 개발: 생태계 부문의 산불 적응대책을 중심으로

김아라* · 송영일** · 박진한***†

*한국환경연구원 국가기후위기적응센터 초빙연구원, **한국환경연구원 국가기후위기적응센터 선임연구위원,

***한국환경연구원 국가기후위기적응센터 부연구위원

Development of a methodology for analyzing the risk reduction effect of climate change adaptation plans: Forest fire adaptation plans in the ecosystem sector

Kim, Ara* · Song, Youngil** and Park, Jin-Han***†

*Invited Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

**Senior Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

***Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

ABSTRACT

Korea has sought to adapt to climate change by regularly establishing and implementing national climate change adaptation plans covering various sectors such as water management, agriculture, and the ecosystem. In order to implement adaptation policies efficiently, it is necessary to establish and implement appropriate policies to reduce future climate change risk, considering the risk reduction effect of different adaptation plans. However, a methodology for evaluating the risk reduction of different adaptation policies has not yet been developed. Therefore, to increase the effectiveness of adaptation plans, this study aims to establish a methodological basis for quantitatively assessing the risk reduction effect. This study targeted the ecosystem sector in “The Third National Climate Change Adaptation Plan” and reviewed adaptation policies by focusing on forest fires from among different climate risk categories. We set proxy variables based on the contents of adaptation plans and risk, collected relevant data, and conducted non-linear regression analysis to extract the forest fire damage function using adaptation policies. The risk reduction effect of plans responding to forest fires during droughts was found to be an average 4.15% decrease per 10% fire fuels reduction per hectare. Our methodology can be used in other sectors and can contribute to establishing and implementing effective adaptation policies by estimating future climate change risk reduction.

Key words: Climate Change Risk, Climate Change Adaptation, Adaptation Plan, Risk Reduction Effect

1. 서론

기후변화 적응은 이미 발생하였거나 발생이 예상되는 기후변화 영향을 완화하고 예방하기 위한 필수가 되었다 (Biswas and Rahman, 2023; McEvoy et al., 2013). 그에 따라 우리나라는 지난 2010년부터 ‘국가 기후변화 적응대책’과 ‘기후변화 적응대책 세부 시행계획’을 수립 및 이행해 오

고 있다. 현재까지 1, 2, 3차에 걸쳐 적응대책이 수립되었으며 최근에는 ‘제3차 국가 기후변화 적응대책(2021 ~ 2025)’을 보완한 ‘제3.5차 국가 기후변화 적응대책’이 수립되었다.

기후변화 적응대책은 기본적으로 기후변화의 발생가능성(Probability)과 그 결과(Consequence)의 함수로 정의되는 기후변화 리스크의 평가를 기반으로 수립됐다(Mach et al., 2014). 리스크 평가는 각 분야의 전문가들이 특정 시공

†Corresponding author : jinhan@kei.re.kr (KT&G Sejong Tower A, 411 Hannuridaero, Sejong-si 17104, Korea. Tel. +82-44-415-7780)

ORCID 김아라 0000-0002-9501-3765 송영일 0000-0002-6677-7336

박진한 0000-0002-4186-0467

간 범위에서 발생할 수 있는 분야별 리스크 목록을 작성하고 리스크 목록별 시급성, 중요성, 발생가능성 등을 판단하여 적응대책 수립·이행의 상대적 우선순위를 결정하는 근거로 활용되었다(Kang et al., 2016; Kim et al., 2021).

기존의 평가 방법은 기후변화로 인해 발생할 수 있는 리스크 항목을 도출하여 정책적 방향을 설정하는 데에 중요한 역할을 한다(Kim and Yoo, 2023). 또한 이를 통해 수립된 국가의 적응대책은 적응목표, 적응대책 목록, 리스크 간의 상호관계와 연계성을 확보했다는 점에서 의의가 있다. 그러나 기존의 평가가 전문가 설문에 의존하다 보니 전문가들의 주관성을 배제하기 어려운 정성적 평가였기 때문에 리스크를 구성하는 발생가능성과 그 결과에 대한 객관성 확보가 어려웠다(Chae et al., 2020). 따라서 미래에 발생할 수 있는 피해 규모를 예상하고 적절한 대책 마련을 통한 기후변화 리스크 대응을 위해서는 과학적 기반으로 기후변화 리스크를 정량적 평가할 수 있는 방법론 마련이 필요하다.

기후변화 리스크의 정량적 평가는 적응대책 이행에 따라 저감되는 리스크 수준을 파악할 수 있게 한다. 또한 이는 의사결정자들에게 기후변화의 영향과 그에 따른 리스크의 종류 및 크기에 따라 시의적절한 대책을 이행하기 위한 근거로써 활용될 수 있다. 특히, 한정된 자원과 예산 내에서 적응대책의 우선순위를 선정해야 하고 적응대책의 효과가 지역별 특성에 따라 상이한 현실을 고려했을 때, 의사결정에 객관성을 부여할 수 있다는 점에서 적응대책의 리스크 저감효과를 추정할 수 있는 방법론 마련의 중요성은 더 강조된다.

따라서 본 연구는 국가에서 수립한 적응목표, 적응대책, 리스크의 상호관계 및 연계성을 검토하고 적응대책의 이행을 통해 도출될 수 있는 기후변화 리스크의 저감효과에 대한 정량적 평가 방법론을 마련하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 생태계 부문에서 산불과 관련된 대책을 대상으로 한 시범적 평가를 통해 방법론 마련을 진행할 것이다.

그리고 생태계 외에 여러 부문과 대책에 활용될 수 있는 방향을 제시하려 한다. 본 연구는 적응대책에 대한 리스크 저감효과를 정량화하는 초기 연구라는 점에서 향후 기후변화 적응대책 이행의 실효성 확보에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 ‘제3차 국가 기후변화 적응대책’에서 수립한 적응대책을 대상으로 분석하였으며 아래의 6단계로 진행하였다(Fig. 1). 1단계는 적응대책 검토, 2단계는 적응대책과 관련된 데이터 수집, 3단계는 데이터 전처리, 4단계는 회귀분석 및 매개변수 추정, 5단계는 적응대책 매개변수의 회귀분석, 6단계는 리스크 저감효과 평가이다.

2.1. 평가 부문 및 적응대책 선정

본 연구에서 평가할 적응대책을 선정하기 위해 ‘제3차 국가 기후변화 적응대책’(이하 국가 대책)을 검토하였다. 국가 대책에서는 물관리, 생태계, 국토·연안, 농수산, 건강, 산업·에너지 부문을 다루고 있다. 본 연구는 현시점에서 중요한 이슈인 도시의 회복력(resilience)을 증가시키고 기후변화 리스크를 감소시킬 수 있는 생태계 기반 적응대책을 고려하여(UNEP, 2019) 여러 부문 중 생태계 부문에 집중하였다.

최근 우리나라는 기후변화로 인해 가뭄이 극심해지면서 산불의 발생빈도와 규모가 증가하고 있다(Sung et al., 2010; Won et al., 2016). 지난 2019년에는 강원도 고성부터 속초시까지 약 1,267 ha, 강릉시부터 옥계면까지 약 1,260 ha가 소실되는 대형산불이 발생한 바 있다. 따라서 본 연구는 생태계 부문에 제시된 총 18개의 리스크 중에서 ‘가뭄으로 인한 산불 발생 증가 및 대형화’를 산불 리스크로 정의하고 이에 대응할 수 있는 적응대책의 리스크 저감효과를 파악하는 것이 중요하다고 판단했다.

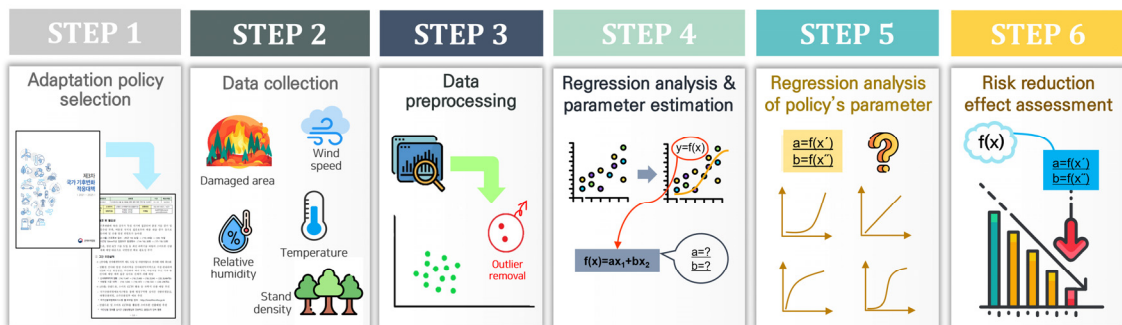


Fig. 1. Research flow to assess the risk reduction effect of adaptation plan

국가 대책에서는 산불에 대응하기 위해 ‘산불 예측 체계 구축 및 고도화’가 수립되었다. 이 대책은 빅데이터와 최신 기술을 접목한 스마트한 산불 예방을 목적으로 하며, 산불위험 계절중기 예보 체계 시스템 운영, 드론 산불 진화대 투입 및 스마트 CCTV 확대 설치, 대형산불 예방을 위해 산불에 강한 숲으로 개선하는 것을 세부 대책으로 계획하고 있다. 세부 대책 중에서 대리변수의 도출 가능성, 데이터의 가용성 등을 고려하여, 본 연구에서는 산불에 강한 숲으로 개선하는 대책인 ‘산불 예방 숲 가꾸기’와 ‘내화 수림대 조성’의 산불 리스크 저감효과를 평가하고자 한다. 평가 지역은 지난 10년간(2010~2020년) 산불이 가장 많이 발생했던 경기도(전체 산불 발생 건수의 21.6%)와 국토면적 대비 산림면적이 가장 넓은 강원도(81.2%)로 한정하였다(Korea Forest Service, 2023).

2.2. 대리변수 설정 (1단계)

산불 적응대책의 리스크 저감효과를 평가하기 위해서는 우선적으로 산불 피해함수를 구축해야 한다. 산불 피해함수는 과거에 발생한 산불의 피해 면적과 산불이 발생한 날의 기상 데이터를 사용하여 구축할 수 있다. 그리고 관련 데이터를 수집하기 위해서는 리스크와 적응대책에 대한 대리변수를 설정하는 것이 필요하다. 기후변화에 기인하는 이상기상 현상에 의해 기후변화 리스크가 증가하는데 이 리스크는 적응대책을 이행함으로써 감소된다는 개념을 토대로 대리변수를 설정하였다. 기후변화에 기인하는 이상기상 현상은 원인으로 작용하기 때문에 독립변수, 증가하는 리스크는 결과이므로 종속변수라고 정의하였다. 그리고 적응대책의 이행은 산불 피해 규모에 영향을 주는 매개효과를 가지는 매개변수로 정의된다.

따라서 본 연구에서 기후변화 리스크의 분석 대상으로 선

정한 ‘가뭄으로 인한 산불 발생 증가 및 대형화’의 경우에는 ‘산불 피해 면적’을 산불 리스크의 종속변수로, 가뭄을 독립변수로 설정하였다. 가뭄의 대리변수로는 산림청에서 국가산불위험예보시스템에서 활용하고 있는 ‘산불위험지수(Daily Weather Index, DWI)’를 설정하였다. 산불위험지수는 온도, 습도, 풍속 등의 기상 자료를 이용하여 평균온도, 상대습도, 실효습도, 평균풍속을 종합한 지수로 0부터 100까지의 값으로 수치화된다(Kang et al., 2019). 산불위험지수의 값이 클수록 더 건조하다는 것을 의미하기 때문에 산불 발생과 양의 상관관계를 가지며 산불 발생에 대한 예측력이 평균 79.3%로 높은 편으로 산불 피해 면적과의 피해함수를 구축하기에 적절한 변수라고 판단했다(Won et al., 2018).

적응대책의 대리변수로는 ‘임목 연료량’을 설정하였다. 이는 본 연구에서 평가 대상으로 선정한 적응대책인 ‘산불 예방 숲 가꾸기’와 ‘내화 수림대 조성’의 목적을 고려한 것이다. 이 대책들은 산림의 임목 밀도를 조절하여 산불의 연료량을 줄여서 산불을 예방하고 산불 확산을 방지할 수 있다(Lim and Chae, 2022; Stephens et al., 2012).

2.3. 데이터 수집 및 전처리 (2, 3단계)

본 연구는 과거 10년간(2010~2020년)의 산불위치정보 데이터를 기반으로 산불이 발생한 위치, 일시, 면적 데이터를 추출하여 경기도와 강원도 지역으로 정리하였다. 그리고 산불이 발생한 위치와 일시에 해당하는 지역의 온도, 풍속, 습도 데이터를 수집하여 식 (1)과 식 (2)를 통해 산불위험지수를 산정하였다(Adjusted by Won et al. (2018)). 임목 연료량의 경우, 경기도와 강원도의 과거 10년간(2010~2020년) 조사된 수종, 영급, 경급, 임목 밀도, 임목 축적 데이터를 수집하였고 국립산림과학원에서 개발한 산불연료모델 기준에 근거하여 추산하였다(Lee et al., 2022). 구축한 데이터는 검

$$H_e = \frac{H_0 + \gamma(H_1) + \gamma^2(H_2) + \gamma^3(H_3) + \gamma^4(H_4)}{1 + \gamma + \gamma^2 + \gamma^3 + \gamma^4} \tag{1}$$

H_e : The effective humidity H_0 : The average relative humidity of the day
 H_n : The average relative humidity of days prior r : Effective humidity coefficient (0.7)

Spring & Summer $100 \times [1 + \exp(0.055Rh + 0.023Eh + 0.014W_{mean} - 0.088T_{mean} - 2.706)]^{-1}$
 Fall & Winter $100 \times [1 + \exp(0.069Rh + 0.182W_{mean} - 0.117T_{mean} - 1.099)]^{-1}$ (2)

Rh : relative humidity Eh : effective humidity
 W_{mean} : average wind speed T_{mean} : average temperature

토를 통해 높은 산불위험지수 대비 산불 피해 면적이 너무 좁은 경우 중 일부를 이상치로 간주하고 제거한 후에 분석을 진행하였다.

2.4. 통계분석 (4, 5, 6단계)

산불 피해 면적과 산불위험지수 데이터를 적용하여 경기도와 강원도의 산불 피해함수 도출을 위한 회귀분석을 진행하였다. R²값을 기준으로 설명력이 가장 높은 회귀식을 최종적인 산불 피해함수로 도출하였다. 이 과정에서 n개의 관측값과 임의의 곡선 함수 $f(x, \beta)$ 에 대한 편차 제곱의 합이 최소가 되는 매개변수 β 를 찾는 방식으로 비선형 회귀분석에서 매개변수를 추정할 때 널리 사용되는 레벤버그-마퀴트(Levenberg-Marquardt, LM) 방법을 사용하여 도출된 회귀식으로부터 매개변수를 최적화하였다(Gavin, 2019; Lourakis et al., 2005). 산불 피해함수에서 최적화된 매개변수를 종속 변수로, 임목 연료량 데이터를 독립변수로 적용하여 경기도와 강원도에 대한 회귀분석을 추가로 진행하였고, 산불 피해함수와 동일하게 LM 방법을 사용하여 임목 연료량의 매개변수를 추정하였다. 본 연구의 모든 통계분석은 IBM SPSS 27 소프트웨어를 이용하여 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산불 피해함수

경기도와 강원도에서 2010년부터 2020년까지 발생한 산불의 면적과 산불이 발생한 날의 기상 데이터에 기반한 산불 위험지수에 대한 회귀분석 결과, 두 지역 모두 비선형 회귀 모형인 자연 지수 함수(Exponential Function)가 채택되었다(Fig. 2, blue line). 경기도와 강원도는 모두 산불위험지수가 커질수록 산불 피해 면적이 지수적으로 증가하였다. 상대습도가 낮을수록 커지는 산불위험지수의 성격을 고려하면 채택된 산불 피해함수는 건조할수록 경기도와 강원도의 산불 피해 면적이 증가한다는 것을 의미한다. 1984년부터 2020년까지 미국 서부에서 발생한 산불의 피해 면적 역시 대기의 건조도와 양의 상관관계를 갖는 수증기압차이(Vapor Pressure Deficit)에 따라 지수적으로 증가한다는 기존 연구의 결과를 고려해 보면(Abatzoglou et al., 2021; Juang et al., 2022) 본 연구에서 도출된 산불 피해함수는 산불위험지수와 산불 피해 면적의 특성을 잘 반영하고 있는 결과라고 사료된다.

그러나 경기도 및 강원도 지역의 산불 피해함수 내 매개변수에는 차이가 있었다(Table 1). 매개변수는 피해함수 곡

선의 형태를 결정하는데 자연 지수 함수의 경우 $y=a*e^{bx}$ 의 형태이므로 2개의 매개변수 a, b를 갖는다. 여기서 매개변수 a는 곡선의 기울기를 동일하게 유지한 상태로 산불위험지수에 따라 좌우로 이동하게 하는 역할을 한다. 반면, 매개변수 b는 곡선의 기울기를 변화시키기 때문에 b 값이 증가할수록 동일한 산불위험지수에서 발생하는 산불 피해 면적이 커지게 한다. 또한 산불위험지수 증감에 따른 산불 피해 면적의 증감률이 상승하게 하는 역할을 한다. 따라서 매개변수 a와 b가 상이한 경기도와 강원도의 산불 피해함수 곡선의 형태는 다르게 나타났다. 이는 동일한 산불위험지수에서 발생한 산불 피해 면적이 지역에 따라 다를 뿐만 아니라 산불로 인한 피해 면적이 기하급수적으로 증가하는 임계 산불 위험지수 역시 다르게 도출될 수 있음을 시사한다.

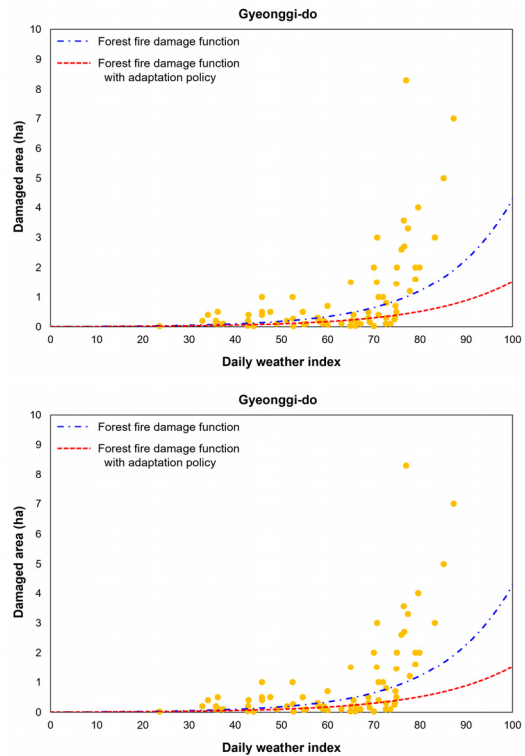


Fig. 2. Forest fire damage function with/without adaptation plan in Gyeonggi-do and Gangwon-do

Table 1. Parameter value of forest fire damage function of Gyeonggi-do and Gangwon-do

Region	Parameter a	Parameter b	R ²
Gyeonggi-do	0.008	0.0628	0.509
Gangwon-do	0.0016	0.143	0.686

3.2. 매개변수별 적응대책 함수

산불 피해함수의 곡선 형태를 결정하는 매개변수 a, b와 ‘산불 예방 숲 가꾸기’ 및 ‘내화수림대 조성’ 대책을 대신하는 변수인 임목 연료량에 대한 회귀분석 결과, 경기도와 강원도 모두 매개변수 a, b와 임목 연료량(fuel) 사이에서 통계적으로 유의미한 선형적인 양의 상관 관계($a=p*fuel+q$, $b=p*fuel+q$)가 있음을 도출하였다(Table 2). 산불 피해 면적에 영향을 주는 산불의 강도와 확산 속도는 연료량과 선형적인 관계가 있다고 보고되어 왔기 때문에(Davis, 1959; Gould, 1994) 산림의 임목 밀도를 조절하여 연료량을 감소시키면 산불로 인한 피해 규모를 줄일 수 있을 것이다.

Table 2. Estimated parameters' value of adaptation plan for forest fire damage function's parameter a and b

Region	Parameter	p	q	R ²
Gyeonggi-do	a	0.0028	-0.3592	0.57
	b	0.0023	-0.2681	0.69
Gangwon-do	a	0.0005	-0.0063	0.73
	b	0.0049	-0.6472	0.53

따라서 본 연구에서는 매개변수 a와 b에 대한 선형 회귀식을 활용하여 경기도와 강원도의 매개변수 a, b와 각 지역 산림의 연료량을 대입하여 추정된 a, b 사이의 차이를 기준으로 산불에 대한 적응대책 이행에 의한 산불 피해 면적의 변화를 평가하였다(Table 3). 산불 적응대책인 ‘산불 예방 숲 가꾸기’와 ‘내화 수림대 조성’을 통해 임목 밀도를 조절하여 연료량을 감소시키기에 따라 매개변수 a와 b 값이 감소하였다. 이는 산불 피해함수 곡선의 기울기가 완만해지고 동시에 오른쪽으로 이동하게 함으로써 동일한 산불위험지수에 대한 산불 피해 면적을 감소시킨다(Fig. 2, red line).

Table 3. Estimated value of parameter a and b considering adaptation plan

Region	a	Estimated a	b	Estimated b
Gyeonggi-do	0.008	0.007	0.0628	0.0538
Gangwon-do	0.0016	0.0011	0.143	0.14

3.3. 적응대책의 지역별 리스크 저감효과

경기도와 강원도의 가뭄으로 인한 산불 발생 증가 및 대형화하는 리스크는 ‘제3차 국가 기후변화 적응대책’에서 수립한 적응대책인 ‘산불 예방 숲 가꾸기’ 및 ‘내화수림대 조성’을 통해 저감될 수 있음을 확인하였다. 산림 면적 1 ha당 연료량을 10% 감소시키면 산불 피해 면적을 경기도는 평균 4.23%, 강원도는 평균 4.06% 감소시킬 수 있다. 피해 면적의 변화율은 경기도와 강원도가 비슷한 결과가 도출되었지만, 1 ha당 10%만큼의 연료량을 감소시킴으로써 줄어드는 평균 산불 피해 면적은 경기도 0.41 ha, 강원도 92.7 ha로 큰 차이가 있었다. 즉, 동일한 대책을 적용했음에도 불구하고 경기도와 강원도에서 도출되는 리스크 저감효과에는 차이가 있었다는 것이다. 그리고 이 차이는 국토 면적, 산림 면적, 임목 축적량 등 지역이 가지고 있는 고유한 특성에서 기인한 것이라 사료된다(Table 4).

Table 4. The regional characteristics influencing on forest fire in Gyeonggi-do and Gangwon-do

Region	Gyeonggi-do	Gangwon-do
Population (n)	13,427,014	1,542,840
Land area (m ²)	10,041,260	1,682,968
Forest area (m ²)	512,105 (50.23%)	1,366,644 (81.2%)
No. of forest fires (Average No./yr)	87	68.6
Damaged area by forest fires (Average ha/yr)	29.3	466.7
Average growing stock (m ³ /ha)	158.3	183.5
Forest road density (m/ha)	1.82	1.75
No. of fire station	35	18

경기도는 전국에서 가장 빈번하게 산불이 발생하는 지역이지만 산불로 인해 피해받는 연평균 총면적은 29.3 ha이고 산불 1건 발생 당 피해받는 면적은 평균 0.34 ha로 산불로 인한 피해 면적이 넓은 편은 아니었다. 대형산불로 연결되는 경우는 거의 없었는데 이는 경기도에 위치한 산림 내 평균 임목 축적량이 상대적으로 적기 때문으로

판단된다. 또한 35개의 소방서가 위치하고 있는 경기도의 경우, 1개 소방서에서 담당할 수 있는 산림 면적은 약 14,631.8 ha로 산정된다. 이는 국가 전체의 소방서(215개)에서 전국 산림(6,290,000 ha)을 관리한다고 가정하여 계산한 값(29,255.8 ha/개)의 0.5배 수준으로 산불이 발생했을 때 초기 진화에 유리한 조건이라고 할 수 있다. 이처럼 경기도가 가지고 있는 지역적 특성을 고려했을 때, 인구가 많아 입산자실화로 인한 산불 발생은 많지만 초기 진화가 빠르게 이루어져 발생하는 피해 면적이 넓지 않으므로 적응대책을 적용했을 때의 감소되는 절대적인 피해 면적이 좁은 것이라고 할 수 있겠다.

반면, 강원도는 경기도와 상반되게 대형산불이 많이 일어나는 지역으로 과거의 산불 피해 면적이 경기도의 최대 26배 정도이다. 강원도는 우리나라에서 산림 면적이 가장 넓고 임목 축적량이 많은 지역으로 산끼리 연결되어 있어서 대형산불이 발생하기 쉬운 조건을 가지고 있다. 게다가 동해안 지역은 주로 해안을 따라 침엽수의 단순림으로 분포되어 탈 수 있는 연소물이 많고 불에 약해 산불의 대형화 요인이 잠재되어 있으며 소나무나 잣나무 같은 침엽수는 산불에 훨씬 취약할 뿐 아니라 송진이 화재 시 불쏘시개 역할을 해 불이 불기 쉽고 한 번 불으면 급격히 확산이 되는 특징을 가지고 있다(Kim et al., 2015; Kwon et al., 2011). 산악지형 특성상 돌풍이 불거나 강풍이 부는 것이 대표적인 특징이라 할 수 있으며 험한 지리적 특성도 산불 대형화의 하나의 요인이 되고 있다(Park et al., 2019). 이처럼 대형산불이 발생할 수 있는 조건을 갖추고 있는 지역임에도 불구하고 강원도에 위치하고 있는 소방서의 개수가 적고 임도밀도 또한 높은 편이다. 따라서 초기 진화에 어려움이 많은 지역적 특징을 가지고 있기 때문에 산불이 발생했을 때 피해 면적이 넓어질 확률이 크므로 적응대책을 이행했을 때 도출되는 리스크 저감효과인 감소되는 피해 면적이 넓은 것이라고 할 수 있겠다.

적응대책의 리스크 저감효과는 리스크 저감률과 절대적인 리스크 저감 수치, 두 개의 기준으로 표출될 수 있다. 의사결정자는 대책을 이행할 때 지역이 기후변화 영향에 적응해야 하는 방향을 고려하여 두 개의 기준 중에서 우선순위로 두어야 하는 것을 판단하여 적응대책의 실효성을 높일 수 있겠다.

4. 결론

본 연구는 기후변화에 대응하기 위해 정부에서 수립한

‘제3차 국가 기후변화 적응대책’을 기준으로 적응대책 이행에 따른 기후변화 리스크의 저감효과를 정량화할 수 있는 방법론을 시범적으로 마련하였다. 산불이 가장 빈번하게 발생하는 경기도와 산지 면적이 가장 넓은 강원도를 대상으로 산불에 강한 숲으로 개선하는 적응대책의 이행을 통해 생태계 부문의 ‘가뭄에 의한 산불 발생 증가 및 대형화’ 리스크의 저감효과를 평가하였다. 산불 피해함수는 산불 피해 면적, 기온, 습도, 풍속, 임목 연료량 등을 반영하여 비선형 회귀분석을 통해 구축하였다. 그리고 최종적으로는 산림 면적 1 ha당 연료량 10% 저감을 통해 동일한 기상 조건에서 발생할 수 있는 산불의 피해 면적을 평균 4.15% 감소시킬 수 있다는 결과를 도출하였다. 그러나 경기도와 강원도와 같이 산림 면적, 임목 축적량, 임도밀도 등 지역적 특성이 상당히 다른 지역의 경우에는 적응대책 이행에 따른 리스크 저감률뿐만 아니라 절대적인 리스크 저감 수치도 함께 고려해야 함을 보여주는 결과로 평가되었다. 이 결과는 의사결정자들이 예산이 한정된 상황에서 가뭄으로 인한 산불 피해 면적을 효과적으로 줄일 수 있는 우선 지역으로 리스크 저감률은 상대적으로 낮지만 절대적으로 감소되는 피해 면적이 큰 강원도를 선정하는 데에 활용될 수 있다.

기후변화에 시의적절하게 대응하고 적응대책의 실효성을 높이기 위해서는 향후에 본 연구에서 마련한 방법론을 토대로 ‘산불예방 숲가꾸기’와 ‘내화수림대 조성’ 대책의 리스크 저감효과 분석의 공간 범위를 전국의 광역 및 기초 지자체 단위로 확장해야 한다. 그리고 피해함수를 구축하는데 사용되지 않은 실측 데이터를 이용하여 도출된 리스크 저감효과를 검증함으로써 정확성을 높여야 한다. 그러면 동일한 적응대책을 적용할 때 도출되는 산불 리스크 저감효과를 광역 및 기초지자체별 비교가 가능해지기 때문에 의사결정자들에게 적응대책 이행의 지역적 우선순위 선정에 대한 근거를 제공할 수 있다. 또한 목표하는 산불 피해 면적을 감소시키기 위해 필요한 예산을 분배할 때에도 지역별 리스크 저감효과를 기반으로 산정할 수 있다.

본 연구에서 마련한 방법론은 생태계의 산불 리스크 외에 물관리, 건강, 농업 등 다른 부문의 적응대책 이행에 따른 리스크 저감효과를 분석하는 데에 활용될 수 있다. 다른 부문 내 기후 리스크의 원인과 결과에 대한 대리지표를 선정하고 회귀분석을 진행하여 피해함수의 형태를 결정하고 여기에서 추정된 매개변수와 리스크를 저감하기 위해 수립된 적응대책에 대한 대리 지표 사이의 회귀분석을 진행한다. 그리고 적응대책이 고려된 매개변수를 추

정하여 최종 피해함수를 도출함으로써 적응대책의 리스크 저감효과를 정량화할 수 있을 것이다.

본 연구는 의사결정자들이 적응대책의 우선순위를 선정하고 이행하는 데 객관적인 정보를 제공할 수 있도록 하는 방법론 구축의 초석이라는 점에서 의의가 있다. 앞으로 국가 전체에서 수립 및 이행될 적응대책에 대한 리스크 저감효과의 정량적 평가에 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(2022003570007).

References

- Abatzoglou JT, Battisti DS, Williams AP, Hansen WD, Harvey BJ, Kolden CA. 2021. Projected increases in western US forest fire despite growing fuel constraints. *Commun Earth Environ* 2: 227. doi: 10.1038/s43247-021-00299-0
- Biswas RR, Rahman A. 2023. Adaptation to climate change: A study on regional climate change adaptation policy and practice framework. *J Environ Manag* 336, 117666. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117666
- Chae Y, Park J, Choi Y, Kim D, Yang Y, Kim H, Seo S, Sung J. 2020. Building and assessing adaptive capacity to climate change for the national risk management: Economic analysis of the extreme climate risks. Sejong, Korea: Korea Environment Institute. Policy Report 2020-000009.
- Davis KP. 1959. *Forest fire: Control and use*. New York: McGraw-Hill.
- Gavin HP. 2019. The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems. Durham, US: Duke University.
- Gould JS. 1994. Evaluation of McArthur's control burning guide in regrowth eucalyptus sieberi forest. *Aust For* 57(2): 86-93. doi: 10.1080/00049158.1994.10676120
- Juang CS, Williams AP, Abatzoglou JT, Balch JK, Hurteau MD, Moritz MA. 2022. Rapid growth of large forest fires drives the exponential response of annual forest-fire area to aridity in the Western United States. *Geophys Res Lett* 49(5): e2021GL097131. doi: 10.1029/2021GL097131
- Kang Y, Shin J, Park CS. 2016. Assessing climate change risk and adaptation policy improvements through text-mining. *J Urban Des Inst Korea* 17(2): 69-84 (in Korean with English abstract).
- Kang YJ, Park SM, Jang EN, Im JH, Kwon CG, Lee SJ. 2019. Spatio-temporal enhancement of forest fire risk index using weather forecast and satellite data in South Korea. *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 22(4): 116-130 (in Korean with English abstract). doi: 10.11108/kagis.2019.22.4.116
- Kim A, Koh J, Yoo G. 2021. Citizen science trends and implications in the field of climate change adaptation. *J Clim Change Res* 12(5-1): 397-407 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2021.12.5.397
- Kim A, Yoo G. 2023. Field-based heatwave risk assessment of outdoor workers measured by wearable sensors. *Asia Pac J Atmos Sci* 59(4): 447-458. doi: 10.1007/s13143-023-00326-4
- Kim YS, Won MS, Youn SH. 2015. Fuel type classification of *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis* forest stand in South Korea. *Proceedings of the 16th Conference on Agricultural and Forest Meteorology; 2015 Aug 25; College of Agriculture & Life Sciences Jeonbuk National University. Jeonju, Korea: The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology Conference. p. 121-125.*
- Korea Forest Service. 2023. Forestry statistics platform. <https://kfss.forest.go.kr/stat/>
- Kwon CG, Lee SY, Lee HP. 2011. Analysis of forest fire conditions on forest structure changing annually. *Proceedings of 2011 Spring Annual Conference; 2011 Apr 21~Apr 22; Jeonju University Star Center. Jeonju, Korea: Korea Institute of Fire Science & Engineering. p. 421-425.*
- Lee S, Kim S, Seo K, Kwon C, Lee Y, Ryu J. 2022.

- Forest fire fuel map. Seoul, Korea: Korea Forest Research Institute. Policy Report 2022-1036.
- Lim CJ, Chae H. 2022. Predicting forest fire danger using fuel characteristics of forest. *J Korean Soc Hazard Mitig* 22(6): 125-132 (in Korean with English abstract). doi: 10.9798/KOSHAM.2022.22.6.125
- Lourakis MI. 2005. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar. Heraklion, Greece: Foundation of Research and Technology - Hellas.
- Mach KJ, Planton S, von Stechow C. 2014. Annex II: glossary. In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC. p. 117-130.
- McEvoy D, Fünfgeld H, Bosomworth K. 2013. Resilience and climate change adaptation: The importance of framing. *Plan Pract Res* 28(3): 280-293. doi: 10.1080/02697459.2013.787710
- Park C, Shin S, Choi S, Joe S, Noe E. 2019. Deduction of risk assessment (RA) items through the characteristics and vulnerabilities of Gangwon fire. *J Soc Cult Herit Disaster Prev* 4(1): 55-64 (in Korean with English abstract).
- Stephens SL, McIver JD, Boerner RE, Fettig CJ, Fontaine JB, Hartsough BR, Schwilk DW. 2012. The effects of forest fuel-reduction treatments in the United States. *BioScience* 62(6): 549-560. doi: 10.1525/bio.2012.62.6.6
- Sung MK, Lim GH, Choi EH, Lee YY, Won MS, Koo KS. 2010. Climate change over Korea and its relation to the forest fire occurrence. *Atmosphere* 20(1): 27-35 (in Korean with English abstract).
- UNEP. 2019. *Ecosystem-based adaptation*. Nairobi, Kenya: Author. Briefing Note Series.
- Won M, Yoon S, Jang K. 2016. Developing Korean forest fire occurrence probability model reflecting climate change in the spring of 2000s. *Korean J Agric For Meteorol* 18(4): 199-207 (in Korean with English abstract). doi: 10.5532/KJAFM.2016.18.4.199
- Won M, Jang K, Yoon S. 2018. Development of the national integrated Daily Weather Index (DWI) model to calculate forest fire danger rating in the spring and fall. *Korean J Agric For Meteorol* 20(4): 348-356 (in Korean with English abstract).